

Адаптивные изменения березы повислой *Betula pendula* и клена остролистного *Acer platanoides* в техногенных условиях

Л.П. Авдашкова, Е.Г. Тюлькова

Представлены результаты оценки адаптивных изменений березы повислой *Betula pendula* и клена остролистного *Acer platanoides*, произрастающих на территории промышленных предприятий западной промышленной зоны г. Гомеля, с учетом морфометрических параметров листовой пластинки и ее зольности. В результате исследований установлено, что в техногенных условиях исследуемые древесные растения демонстрируют незначительные и умеренные адаптивные изменения под влиянием техногенных воздействий. При снижении общих объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу наблюдается снижение величины общей оценки адаптивных изменений. **Ключевые слова:** техногенное воздействие, береза повислая *Betula pendula*, клен остролистный *Acer platanoides*, адаптивные изменения, длина листовой пластинки, ширина листовой пластинки, зольность, фитоиндикация.

The results of adaptive changes evaluation of drooping birch *Betula pendula* and norway maple *Acer platanoides* growing on the territory of industrial enterprises western industrial zone of Gomel city, considering the leaf blade morphometric parameters and its ash content are considered. As a result of research it is established that in technogenic conditions the studied woody plants exhibit minor and moderate adaptive changes under the anthropogenic influence. With a decrease in total emissions of pollutants into the atmosphere, a decrease in the magnitude of the overall assessment of adaptive changes is observed.

Keywords: technogenic influence, drooping birch *Betula pendula*, norway maple acutifoliate *Acer platanoides*, adaptive changes, leaf blades length, leaf blade width, ash, phytoindication.

Введение. Изучение адаптивных реакций растений к техногенным условиям является одной из ключевых проблем геохимии ландшафта.

Известно, что техногенное влияние на рост и развитие растений может привести к устойчивому снижению радиального прироста древесных растений [1], [2]. Методами корреляционного анализа выявлена отрицательная корреляционная связь между содержанием оксидов азота и углерода в атмосферном воздухе и показателем жизненного состояния древесных растений. Кроме того, в условиях загазованности у деревьев отмечается более раннее появление зеленого конуса листьев, сокращение продолжительности цветения, более поздняя осенняя окраска и начало листопада [2]. Результаты оценки состояния фотосинтетического аппарата свидетельствуют о том, что в городских условиях наблюдается проявление обширного некроза листовой пластинки, ослабления древесных растений [3]. Ослабление древесных растений, подверженных воздействию болезней, вредителей, в условиях урбанизированной среды еще больше усугубляет их состояние и может привести к преждевременной гибели. Поэтому исследование адаптационных механизмов к произрастанию в условиях техногенного влияния имеет важное значение.

Адаптацию растений следует рассматривать в широком диапазоне. Прежде всего, растения приспосабливаются к климатическим факторам (температуре и осадкам) – климатическая адаптация, к условиям питания – агрохимическая адаптация, к загрязнению среды – геохимическая адаптация. Каждый из этих видов адаптации при экстремальных условиях может приводить к изменению в растениях физиологического, биохимического и морфологического механизма.

В настоящее время при исследованиях техногенных ландшафтов мало обращается внимания на изучение морфологии, зольности и химического состава растений, что затрудняет осуществление количественной оценки их адаптивных изменений [4], [5], [6]. Поэтому целью данной работы является количественная оценка адаптивных изменений древесных растений, произрастающих в условиях техногенного воздействия, с учетом морфологии и зольности их листовых пластинок.

Задачи работы: 1) определить длину, ширину и зольность листовых пластинок древесных растений, произрастающих в условиях техногенного воздействия промышленных предприятий города Гомеля; 2) провести количественную оценку адаптивных изменений древесных растений при развитии в техногенных условиях с учетом длины, ширины и зольности листовых пластинок.

Материал и методы. Для проведения количественной оценки механизма адаптации березы повислой *Betula pendula* и клена остролистного *Acer platanoides* как представителей древесных растений с мелкой и крупной листовой пластинкой были выбраны такие критерии как морфометрия и зольность листовой пластинки, так как эти показатели актуальны для прогнозирования изменений фитоценозов под влиянием техногенных элементов; кроме того, их определение достаточно экономично.

Пробы листьев отбирали на территориях предприятий западной промышленной зоны города Гомеля в течение вегетационного периода (июль, август) 2016 г. (зона отличается наибольшим суммарным объемом выбросов загрязняющих веществ в атмосферу по сравнению с северной и южной промышленными зонами). Фоновыми условиями явилась парковая зона города Гомеля.

Для определения зольности отобранные образцы высушивали и методом сухого озоления в муфельной печи определяли содержание золы (повторность – не менее трехкратной для суммарных проб из данной точки наблюдений). Адаптивные изменения в связи с произрастанием в техногенных условиях (*АП*) оценивали по формуле:

$$\Delta I = \tilde{N}_a \times \tilde{A}_a + \tilde{N}_o \times \tilde{A}_o + \tilde{N}_c \times \tilde{A}_c,$$

где C – степень адаптивных изменений (по длине, ширине и зольности листа), Γ – глубина адаптивных изменений (по длине, ширине и зольности листа).

Математическую обработку цифрового материала выполняли в Excel.

Результаты и их обсуждение. Результаты определения морфометрических параметров и зольности листовых пластинок представлены в таблицах 1 и 2. Промышленные предприятия западной промышленной зоны в таблицах расположены в порядке снижения величины общего объема выбросов загрязняющих веществ.

Таблица 1 – Морфометрические параметры и зольность листовой пластинки березы повислой *Betula pendula*

Место отбора проб	Морфометрия, см		Зольность, %	Стандартное отклонение		
	длина	ширина		длина	ширина	зольность
западная промышленная зона						
1	4,40 ± 0,003	3,71 ± 0,003	2,5 ± 0,006	0,53	0,50	0,29
2	5,16 ± 0,003	4,64 ± 0,003	5,5 ± 0,013	0,51	0,54	0,60
3	5,74 ± 0,003	4,72 ± 0,003	3,5 ± 0,007	0,64	0,47	0,33
4	5,17 ± 0,003	4,05 ± 0,002	4,5 ± 0,006	0,53	0,39	0,27
5	5,71 ± 0,004	4,40 ± 0,003	7,0 ± 0,008	0,67	0,52	0,36
6	5,19 ± 0,003	4,19 ± 0,002	5,0 ± 0,010	0,59	0,39	0,48
7	6,31 ± 0,005	4,80 ± 0,004	5,5 ± 0,006	0,95	0,71	0,29
фоновая территория						
8	6,37 ± 0,005	4,87 ± 0,003	3,5 ± 0,005	0,83	0,45	0,25

Примечание. Здесь и далее в таблицах 2 – 4: 1 – ОАО «Гомельский химический завод»; 2 – ТЭЦ-2; 3 – ОАО «Гомельский литейный завод «Центролит»; 4 – ОАО «Гомельский домостроительный комбинат»; 5 – западная котельная; 6 – ОАО «Гомельский радиозавод»; 7 – ОАО «Гомельский завод пусковых двигателей имени П.К. Пономаренко»; 8 – парковая зона.

Таблица 2 – Морфометрические параметры и зольность листовой пластинки клена остролистного *Acer platanoides*

Место отбора проб	Морфометрия, см		Зольность, %	Стандартное отклонение		
	длина	ширина		длина	ширина	зольность
западная промышленная зона						
1	9,76 ± 0,009	12,45 ± 0,011	3,5 ± 0,004	1,67	2,0	0,20
2	13,41 ± 0,012	16,65 ± 0,014	8,5 ± 0,006	2,05	2,41	0,27
3	11,46 ± 0,009	15,06 ± 0,011	4,0 ± 0,004	1,69	1,95	0,21
4	12,77 ± 0,008	16,36 ± 0,012	8,5 ± 0,006	1,34	1,99	0,27
5	12,87 ± 0,013	16,0 ± 0,015	9,5 ± 0,008	2,20	2,58	0,37
6	12,31 ± 0,008	15,82 ± 0,012	5,5 ± 0,006	1,44	2,06	0,29
7	11,33 ± 0,010	15,44 ± 0,014	10,5 ± 0,006	1,65	2,43	0,29
фоновая территория						
8	14,14 ± 0,008	17,45 ± 0,012	11,0 ± 0,007	1,48	2,16	0,32

Из данных таблиц 1 и 2 видно, что средняя длина и ширина листовой пластинки древесных растений, произрастающих на территории промышленной зоны, различается и в большинстве случаев ниже по сравнению с аналогичными параметрами фоновой территории. Различия в интенсивности техногенного воздействия привели к тому, что величина стандартного отклонения длины, ширины и зольности листовой пластинки характеризуется тенденцией увеличения от территории с более высоким объемом выбросов загрязняющих веществ к территории с более низким техногенным воздействием.

Это указывает на то, что в этом регионе на территории предприятий на формирование длины и ширины листовой пластинки действует стабилизирующий отбор, вызванный экологическим напряжением и обеспечивающий накопление частот рассматриваемых параметров в области средних величин.

Для выявления различий между исследуемыми параметрами в техногенных и фоновых условиях была проверена гипотеза о равенстве средних значений. В результате было получено, что p -значения составляют меньше 0,05, что указывает на значительные различия средних величин (таблицы 1–2.).

Общая оценка адаптивных изменений (АП), характеризующих адаптивный потенциал древесных растений, предусматривала определение степени и глубины адаптивных изменений всех исследованных параметров листа. При этом степень характеризует частоту отклонений исследуемых параметров от фоновых значений, т.е. количество фактически адаптированного материала; глубина – на сколько значительны эти отклонения по сравнению с фоновыми условиями.

С целью определения величины степени адаптивных изменений (С) для каждого морфометрического параметра листовой пластинки каждого из деревьев всех исследуемых территорий на первом этапе была проверена гипотеза о нормальном распределении с помощью критерия Пирсона с уровнем значимости 0,05. В результате доказано, что все величины распределены по нормальному закону во всех случаях (критическое значение статистики хи-квадрат составляет 18,3, наблюдаемые значения представлены в таблице 3).

Для зольности листовой пластинки каждого из деревьев всех исследуемых территорий на первом этапе была проверена гипотеза о нормальном распределении с помощью критерия Шапиро-Уилка (гипотеза о нормальном распределении принимается при $p > 0,05$). При этом было доказано, что все величины распределены по нормальному закону во всех случаях, за исключением клена остролистного на территории ОАО «Гомельский завод пусковых двигателей имени П.К. Пономаренко» (значения уровня значимости p представлены в таблице 3).

Таблица 3 – Наблюдаемые значения статистики по морфометрическим параметрам и значения уровня значимости p по зольности листовой пластинки

Место отбора проб	Морфометрия, см				Зольность, %	
	береза повислая <i>Betula pendula</i>		клен остролистный <i>Acer platanoides</i>		береза повислая <i>Betula pendula</i>	клен остролистный <i>Acer platanoides</i>
	длина	ширина	длина	ширина		
1	181,29	271,99	159,84	53,79	0,11	0,66
2	26,92	179,32	1328,64	54,29	0,41	0,79
3	176,99	147,24	19,87	48,27	0,35	0,53
4	200,47	228,03	46,27	23,97	0,16	0,51
5	190,39	180,37	19,44	23,72	0,62	0,11
6	169,12	324,46	1310,43	15,39	0,06	0,44
7	54,65	101,96	26,89	13,91	0,61	0,01
8	118,57	151,91	46,26	27,79	0,53	0,39

Значения величины степени адаптивных изменений (С) по каждому параметру находили как разность между площадью под кривой плотности нормального распределения признака в техногенных условиях, равной 1,0, и площадью перекрытия техногенной и фоновой кривых.

С этой целью было проведено попарное сравнение функций плотностей распределения вероятностей:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}},$$

где a – среднее значение параметров, σ – стандартное отклонение параметров в техногенных и фоновых условиях.

В результате были получены различные по величине площади перекрывания функций плотности распределения длины и ширины листа.

На примере ОАО «Гомельский литейный завод «Центролит» на рисунке 1 представлены графики функций законов распределения. Аналогичные расчеты проведены в отношении остальных исследуемых территорий.

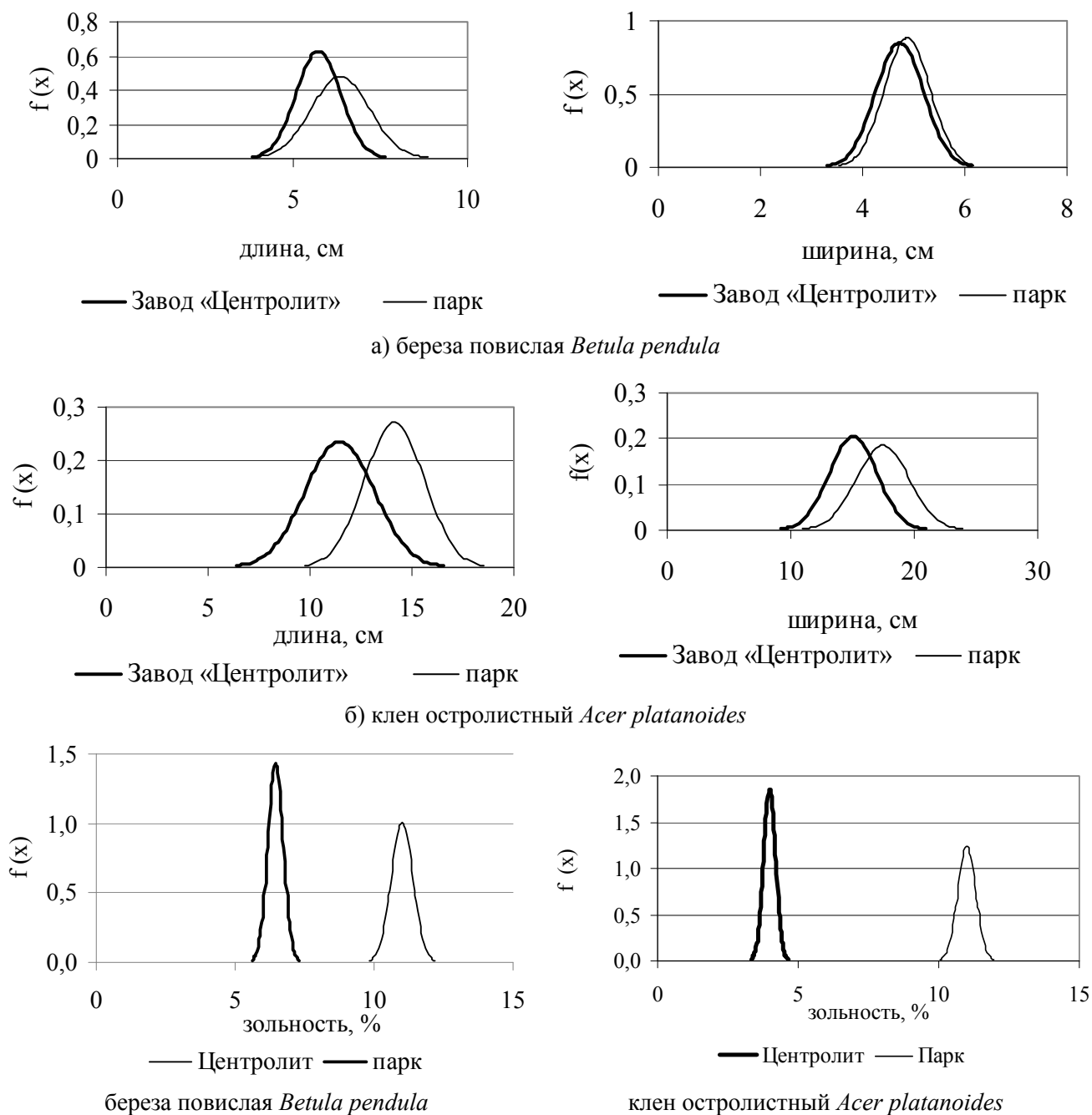


Рисунок 1 – Графики функций законов распределения длины, ширины и зольности листовых пластики березы повислой *Betula pendula* и клена остролистного *Acer platanoides*, произрастающих в техногенных и фоновых условиях

Для нахождения в общем случае точек пересечения графиков функций $f_1(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a_1)^2}{2\sigma_1^2}}$

и $f_2(x) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a_2)^2}{2\sigma_2^2}}$ решали уравнение:

$$f_1(x) = f_2(x) \Rightarrow \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a_1)^2}{2\sigma_1^2}} = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a_2)^2}{2\sigma_2^2}}.$$

После преобразований получили квадратное уравнение

$$(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)x^2 + (2\sigma_2^2 a_1 - 2\sigma_1^2 a_2)x + (\sigma_1^2 a_2^2 - \sigma_2^2 a_1^2 + 2\sigma_2^2 \sigma_1^2 \ln(\sigma_2 / \sigma_1)) = 0.$$

Решения x_1, x_2 ($x_1 < x_2$) уравнений явились точками пересечения графиков.

Площадь общей области, заключенной между графиками и осью ОХ, находили по формуле:

$$S = \Phi\left(\frac{x_1 - a_1}{\sigma_1}\right) - \Phi\left(\frac{-\infty - a_1}{\sigma_1}\right) + \Phi\left(\frac{+\infty - a_2}{\sigma_2}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - a_2}{\sigma_2}\right).$$

Таким образом, получены площади, характеризующие степень адаптации для всех исследуемых показателей листа березы повислой *Betula pendula* и клена остролистного *Acer platanoides* (таблица 4).

Для оценки глубины адаптивных изменений (Γ) длины, ширины и зольности листовой пластинки древесных растений согласно правилу трех сигм рассчитаны интервалы наиболее часто встречающихся значений исследуемых показателей для техногенных и фоновых условий. Коэффициент глубины адаптации оценивали как отношение среднего для тех техногенных значений, которые не оказались среди фоновых, и среднего фоновых. Глубину адаптации (Γ) определили как разность между единицей и коэффициентом глубины адаптации (таблица 4).

Итоговые значения для оценки адаптивных изменений с учетом морфометрии и зольности листовых пластинок представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Оценка адаптивных изменений ($\Delta П$) изменений березы повислой *Betula pendula* и клена остролистного *Acer platanoides*

Место отбора проб	Степень адаптации, <i>С</i>			Глубина адаптации, <i>Г</i>			Общая оценка адаптивных изменений (<i>АП</i>)
	длина	ширина	зольность	длина	ширина	зольность	
береза повислая <i>Betula pendula</i>							
1	0,87	0,78	0,96	0,48	0,41	0,31	1,02
2	0,65	0,06	0,98	0,65	0,27	0,35	0,63
3	0,35	0,13	0,16	0,39	0,30	0,02	0,18
4	0,64	0,67	0,92	0,41	0,34	0,21	0,69
5	0,37	0,38	1,00	0,40	0,35	0,49	0,77
6	0,60	0,58	0,96	0,43	0,33	0,29	0,73
7	0,04	0,21	1,00	0,36	0,31	0,36	0,44
клен остролистный <i>Acer platanoides</i>							
1	0,84	0,77	1,00	0,49	0,50	0,68	1,47
2	0,42	0,15	1,00	0,33	0,42	0,23	0,43
3	0,60	0,44	1,00	0,43	0,42	0,64	1,08
4	0,38	0,21	1,00	0,35	0,39	0,22	0,44
5	0,62	0,25	0,97	0,35	0,45	0,14	0,46
6	0,47	0,30	1,00	0,37	0,41	0,50	0,80
7	0,65	0,48	0,63	0,43	0,35	0,05	0,50

При интерпретации значений $\Delta П$ учитывали, что значение $\Delta П$ изменяется в общем случае от 0 до 3. При этом если $\Delta П$ равно 0, то изменений по совокупности показателей не наблюдалось. Чем больше $\Delta П$, тем больше адаптационные изменения. Если $\Delta П$ равно 3, то это свидетельствует о максимально возможных отклонениях значений фитоиндикаторных признаков от фоновых условий, т. е. это случай максимального проявления адаптации. Кроме того, разработана оценочная шкала величины интегрального показателя адаптации, которая учитывает, что, если $\Delta П \in (0; 0,6)$, то реализация адаптивного потенциала исследуемых пред-

ставителей незначительна; при $АП \in (0,7;1,2)$ – растения демонстрируют умеренную способность приспосабливаться к техногенным условиям; если $АП \in (1,3;1,8)$, то адаптивный потенциал реализован значительно. Сильные адаптационные изменения характеризует $АП \in (1,9;2,7)$ и максимально возможные – $АП \in (2,7;3)$.

В результате проведенных исследований установлено, что в среднем береза повислая *Betula pendula* характеризуется более низким значением величины адаптивных изменений по сравнению с кленом остролистным *Acer platanoides*.

В целом, в техногенных условиях исследуемые древесные растения демонстрируют незначительные и умеренные адаптивные изменения под влиянием техногенных воздействий. Это, с одной стороны, может иметь негативные последствия для развития растения в случае их резких изменений (увеличение объемов выбросов загрязняющих веществ).

Кроме того, как свидетельствуют данные таблицы 4, при снижении общих объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу наблюдается снижение величины общей оценки адаптивных изменений, что в целом можно расценивать как положительный факт, поскольку сильные адаптивные изменения, возможно, являются результатом сильного техногенного воздействия, что отмечено у клена остролистного *Acer platanoides* на территории химического завода ($АП = 1,47$).

Заключение. Количественную оценку адаптивных изменений древесных растений, произрастающих в условиях техногенного воздействия, возможно проводить с учетом степени и глубины изменения морфологии и зольности листовых пластинок. На примере древесных растений с различной площадью листа (береза повислая *Betula pendula*, клен остролистный *Acer platanoides*) установлено, что в техногенных условиях исследуемые древесные растения демонстрируют незначительные и умеренные адаптивные изменения под влиянием техногенных воздействий, а при снижении общих объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу наблюдается снижение величины общей оценки адаптивных изменений с учетом длины, ширины и зольности листа.

Литература

1. Латанов, А.А. Эколого-физиологическая оценка состояния древесных растений и насаждений в зависимости от антропогенной нагрузки в городе Одинцово : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / А.А. Латанов ; Москов. гос. ун-т леса. – Москва, 2012. – 23 с.
2. Ведерников, К.Е. Биоэкологические особенности древесных растений в насаждениях урбано-экосистем: (на примере г. Ижевска) : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.16 / К.Е. Ведерников; Ижевская гос. с.-х. акад. – Тольятти, 2008. – 20 с.
3. Мощеникова, Н.Б. Оценка экологического состояния зеленых насаждений Санкт-Петербурга : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / Н.Б. Мощеникова; Москов. гос. ун-т леса. – Москва, 2011. – 19 с.
4. Гаврикова, В.С. Динамика флуктуирующей асимметрии листьев *Acer platanoides* L. урбанизированных территорий / В.С. Гаврикова, О.А. Игнатюк // Экология и ноосферология. – 2014. – Вып. 25. – С. 34–44.
5. Хикматуллина, Г.Р. Сравнение морфологических признаков листа *Betula Pendula* в условиях урбаносреды / Г.Р. Хикматуллина // Вестник Удмурт. ун-та. – 2013. – Вып. 2. – С. 48–56.
6. Луцишин, Е.Г. Видовая специфичность адаптации древесных растений техногенно трансформированных урбозадафотопов / Е.Г. Луцишин, И.К. Тесленко // Ecology and noospherology. – 2015. – Вып. 26. – С. 42–61.